第31卷　第3期
2017年3月
材料研究学报
CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH
Vol. 31 No. 3
Mar. 2017

# C/C-Cu复合材料的压缩性能及其破坏机理

邓朝勇[1]　张红波[1]　尹 健[1]　熊 翔[1]　王 培[1]　孙 淼[1]　李万千[2]

1 中南大学 粉末冶金国家重点实验室 长沙 410083
2 中南林业科技大学材料科学与工程学院 长沙 410004

**摘 要** 以预浸炭布和铜网为原料用模压压制法制备炭纤维体积分数分别为35%、40%和45%左右的三种C/C-Cu复合材料，用Instron3369力学试验机测试了压缩性能。结果表明：炭纤维的体积分数是影响材料压缩性能的重要因素。在垂直方向上，材料的压缩性能随着炭纤维体积分数的增加而提高。炭纤维体积分数为40%的试样其压缩性能比35%的试样提高了20%，炭纤维体积分数为45%的试样比40%的试样提高了13%，提高的幅度呈先大后小的趋势。而在平行方向上，炭纤维的体积分数对压缩性能的影响没有垂直方向的显著，与试样的致密度有一定的关系。在三种试样中，炭纤维体积分数为45%的试样无论在垂直方向还是平行方向上的压缩强度都最大，分别为190.13 MPa和83.39 MPa。在平行方向和垂直方向上压缩强度的差异表明，C/C-Cu复合材料的压缩性能具有明显的各向异性。关于材料压缩的破坏方式，在垂直压缩受力方向近似沿45°对角线方向时，破坏方式为纤维层、铜网与基体炭的分离以及基体炭的压溃破坏。在平行方向压缩时炭纤维发生褶皱，并在褶皱区域产生拉压应力，使纤维发生折曲或者断裂，最终使炭纤维和基体炭以及基体炭和铜网的界面分层劈裂。

**关键词** C/C-Cu复合材料，压缩性能，各向异性，破坏机理

**中图分类号** TB333　　**文章编号** 1005-3093(2017)03-0182-05

# Compression Performance and Failure Mechanism of C/C-Cu Composites

DENG Chaoyong[1], ZHANG Hongbo[1],YIN Jian[1], XIONG Xiang[1], WANG Pei[1], SUN Miao[1], LI Wanqian[2]

*1 State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China*
*2 Material Science and Engineering School, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China*

Correspondent: YIN Jian, Tel:(0731)88836877, E-mail: melodycyd@163.com.

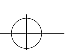
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51302322) and Hunan Provincial Department of Education Youth Fund Project (No. 14C1187)

Manuscript received 2016-04-29, in revised form 2016-12-02

**ABSTRACT** Three composites of C/C-Cu i.e. carbon fiber reinforced carbon-copper mesh with different volume fraction (35%,40% and 45%) of carbon fiber were prepared by pressing mold method and then followed by four times impregnating with resin and three times high temperature carbonizing . Their compressive properties were measured on Instron-3369 mechanical testing machine. The effect of volume fraction of carbon fiber on the compressive property was investigated. The results show that the compression performance of C/C-Cu composites increased with increase of volume fraction of carbon fiber in the vertical direction. The compression strength of the composite with 40% carbon fiber was 20% higher than the one with 35%, and that with 45% carbon fiber was 13% higher than the one with 40%. These imply claerly that the compression strength of the composites first increased and then decreased with the in-

**基金项目** 国家自然科学基金(51302322)和湖南省教育厅青年基金项目(14C1187)
**收稿日期** 2016-04-29 **定稿日期** 2016-12-02
**作者简介** 邓朝勇，男，1984年生，博士
**通讯作者** 尹 健，副教授，melodycyd@163.com，研究方向为炭炭复合材料
**DOI** 10.11901/1005.3093.2016.235





creasing carbon fiber content. On the other hand, the carbon fiber volume fraction has no significant effect on the compression performance in the parallel direction. Among others, the composite with 45% carbon fiber has the best compression strength in both the vertical direction and parallel direction, i.e. 190.13MPa and 83.39MPa respectively. The difference of compressive strength in the vertical direction and parallel direction shows that the compression property of C/C-Cu composites was obviously of anisotropy. By compression stress the composite damaged in the vertical direction along 45° diagonal and in the parallel direction at the interface between the carbon fiber and copper mesh.

**KEY WORD** C/C-Cu composites, compressive properties, anisotropy, failure mechanism



建造高速电气化铁路是衡量一个国家工业制造水平的重要标志[1,2]，但是我国高铁使用的受电弓滑板材料全靠进口[3]。因此，研发具有自主知识产权的高性能受电弓滑板材料刻不容缓。C/C-Cu复合材料具有强度高、导电率高、断裂韧性高、抗热震、膨胀系数低和耐摩擦磨损等性能，是一种能在恶劣自然环境下使用的新型电触材料[4-8]。用来制作受电弓滑板的C/C-Cu复合材料，应该具有足够高的电学性能、摩擦磨损性能和一定的力学性能。本文研究C/C-Cu复合材料的抗压性能及其破坏机理。

## 1 实验方法

### 1.1 材料的制备

以预浸炭布和铜网为原料用模压压制法制备体积分数分别为35%、40%和45%左右的三种C/C-Cu预制体，经多次浸渍树脂-高温炭化制备出三种密度为1.9 g/cm³左右的C/C-Cu复合材料，依次命名为CFRCS-1、CFRCS-2和CFRCS-3。

### 1.2 性能测试

用排水法测试C/C-Cu复合材料的密度和开孔率。用精度为0.001 g的电子分析天平称量试样的干燥试样重量、在酒精中的重量及试样从酒精中取出后的重量。材料的密度和开气孔率分别为

$$\rho = \frac{G_1 \rho_0}{G_3 - G_2} \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{G_3 - G_1}{G_3 - G_2} \times 100\% \tag{2}$$

其中$\rho$为测试试样的密度(g·cm$^{-3}$)；$\rho_0$为酒精的密度，约为0.8 g·cm$^{-3}$；$G_1$为测试试样干燥后的质量(g)；$G_2$为测试试样在酒精中的质量(g)；$G_3$为测试试样从酒精中取出后的质量(g)；$\varepsilon$为测试试样的开气孔率(%)。

按照国家标准GB8489-87用Instron3369力学试验机测量压缩性能，试样的尺寸为10 mm×10 mm×10 mm，每组取4~6个样，加载速度为2 mm/min。压缩强度为

$$\sigma_c = P/A \tag{3}$$

其中$\sigma_c$为压缩压强(MPa)；P为材料破坏时的最大压力(N)；A为压缩面的横截面积(mm²)。由于材料的结构在平行于炭纤维面和垂直于炭纤维面有差异，实验中分别在分平行炭纤维面和垂直炭纤维面测试压缩性能，如图1所示。

## 2 结果和讨论

### 2.1 C/C-Cu复合材料的压缩性能

C/C-Cu复合材料的基本性能列于表1。从表1可知，C/C-Cu复合材料的密度均为1.9 g/cm³左右，铜的质量分数为21%左右，开孔率为3.4%~4.4%，试

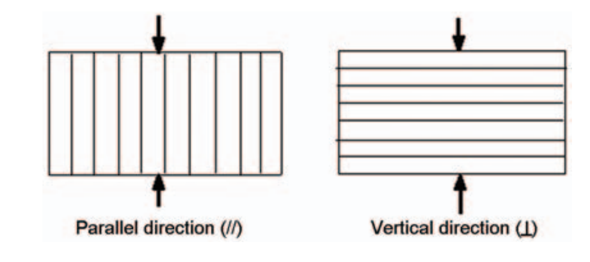



**图1** 压缩加载方向示意图
**Fig.1** Schematic description of loading modes

**表1** C/C-Cu复合材料的基本性能
**Table 1** Basic properties of C/C-Cu composites

| Sample | Cf /v% | Cu /% | Density /(g·cm$^{-3}$) | Porosity /% |
|---|---|---|---|---|
| CFRCS-1 | 35.09 | 21.19 | 1.92 | 3.4 |
| CFRCS-2 | 40.38 | 21.49 | 1.86 | 4.4 |
| CFRCS-3 | 45.55 | 21.01 | 1.96 | 3.7 |

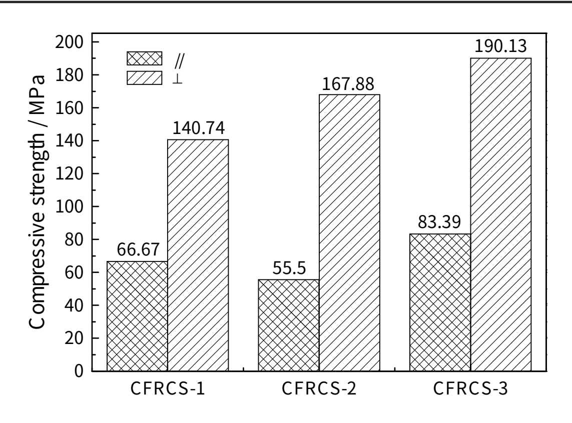
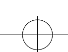



**图2** C/C-Cu复合材料的压缩强度
**Fig.2** Compressive strength of C/C-Cu composites

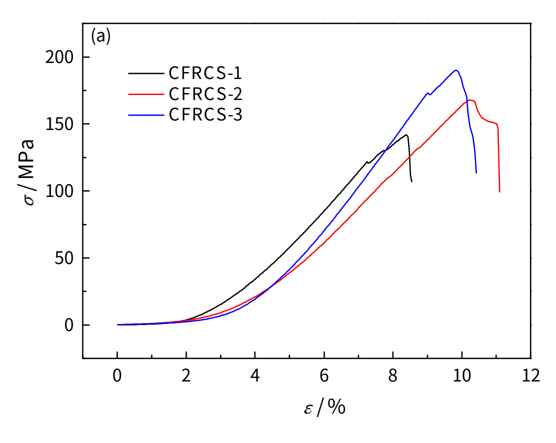


样CFRCS-1、CFRCS-2、CFRCS-3炭纤维的体积分数依次为35.09%、40.38%和45.55%。

图2给出了体积分数为35.09%、40.38%和45.55%的C/C-Cu复合材料在平行方向和垂直方向上的压缩强度值。可以看出，在垂直方向上，随着体积分数的增加炭纤维的压缩强度提高。体积分数为40%的试样比35%的试样压缩强度提高了20%，体积分数为45%的试样较体积分数为40%的试样压缩强度提高了13%，增加的幅度呈先大后小的趋势。而在平行方向上，随着炭纤维体积分数的增加压缩强度呈先下降后增加的趋势。三种试样中炭纤维体积分数为45%的试样无论在垂直方向还是平行方向上其压缩强度都最大，分别为190.13 MPa和83.39 MPa。从图2还可以看出，垂直方向的压缩强度明显高于平行方向上压缩强度。这表明，C/C-Cu复合材料的压缩性能具有明显的各向异性。

**2.2 C/C-Cu复合材料的压缩应力-应变曲线**

图3给出了材料的压缩应力-应变曲线图。从图3a可以看出，在垂直方向上，随着炭纤维体积分数的增加C/C-Cu复合材料的最大压缩应力逐渐提高。其中CFRCS-3的最大压缩应力最大，为190.13 MPa；



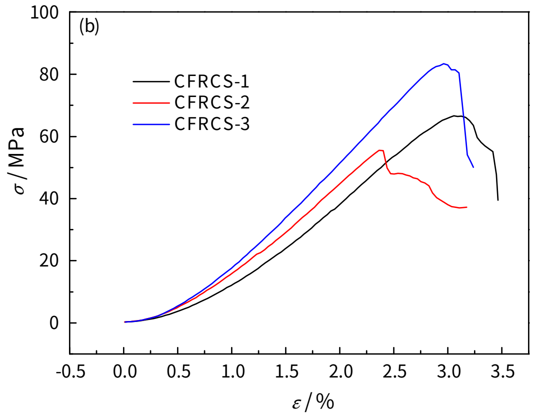




**图3** C/C-Cu复合材料的压缩应力-应变曲线图(a垂直方向，b平行方向)

**Fig.3** Compressive stress-strain curves of C/C-Cu composites (a: vertical direction; b: parallel direction)

CFRCS-1的最大压缩应力最小，为140.74 MPa。CFRCS-1、CFRCS-2和CFRCS-3三组试样的图形几乎线性增大到弹性极限然后发生脆性断裂，表现出典型的脆性断裂特性。从图3b可以看出，在平行方向上，随着炭纤维体积分数的增加C/C-Cu复合材料的最大压缩应力先减小而后又大幅增加，与垂直方向有较大的区别。根据材料的属性，力学性能应该随着炭纤维体积分数的增加而提高。但是炭纤维体积分数为40%的CFRCS-2试样的最大应力并不比炭纤维体积分数为35%的CFRCS-1大。其原因是两个试样的断裂机制不同。图3b表明，CFRCS-1和CFRCS-3在达到最大应力后曲线直线下降，表现出典型的脆性断裂；而CFRCS-2在达到最大应力后曲线呈平台状缓慢下降，表现出韧性断裂。CFRCS-2发生韧性断裂的主要原因是其致密度较低，基体炭层内存在大量微裂纹和孔隙。这些微裂纹和孔隙释放裂纹前沿的应力集中，阻止裂纹扩展，或使裂纹扩展发生偏转，只有载荷继续增加时裂纹才能继续扩展，或者诱发出其他的新裂纹，从而表现出“锯齿形”“假塑性”的特征。

**2.3 C/C-Cu复合材料的压缩断口形貌**

图4给出了压缩断口形貌SEM图。SEM观察分层面，平行压缩试样的层间裂纹沿纤维/基体炭界面，或铜网/基体炭界面扩展。对于锯齿形应力-应变曲线的试样，还观察到部分褶皱破坏。纤维束褶皱伴随着纤维束分层，呈台阶式贯穿试样，导致试样最终破坏。在纤维束褶皱和折断处可观察到部分脆断纤维和基体炭被压溃流失后留下的孔洞。垂直压缩试样的分层裂纹也沿炭纤维/基体炭界面，或铜网/基体炭界面扩展，但是较平行压缩时分层形貌较为平整。在压溃面上残留了大量的基体炭碎屑和大量成束剪切断裂的炭纤维。压缩破坏表现为剪切破坏、分层破坏和压溃破坏。

**2.4 C/C-Cu复合材料的破坏机制[9-11]**

图5给出了压缩试样的宏观图。如图5a所示，各层纤维和铜网依次向外弯曲，甚至折断，在折断的纤维和未折断的纤维之间形成一系列的分层裂纹。根据前文对微观结构的分析，材料的破坏机制为分层劈裂。对于C/C-Cu复合材料，由于纤维和铜网排列层分明，且C和Cu两相几乎不润湿，其层间剪切强度低。在平行压缩条件下载荷加载的方向平行于炭纤维和基体炭，以及基体炭和铜网的界面，压应力或由其引起的剪切应力未达到纯剪切断裂前，剪切应力将首先导致层间劈裂，因此平行压缩时主要发生分层劈裂。在平行方向压缩时纤维束的变形、破

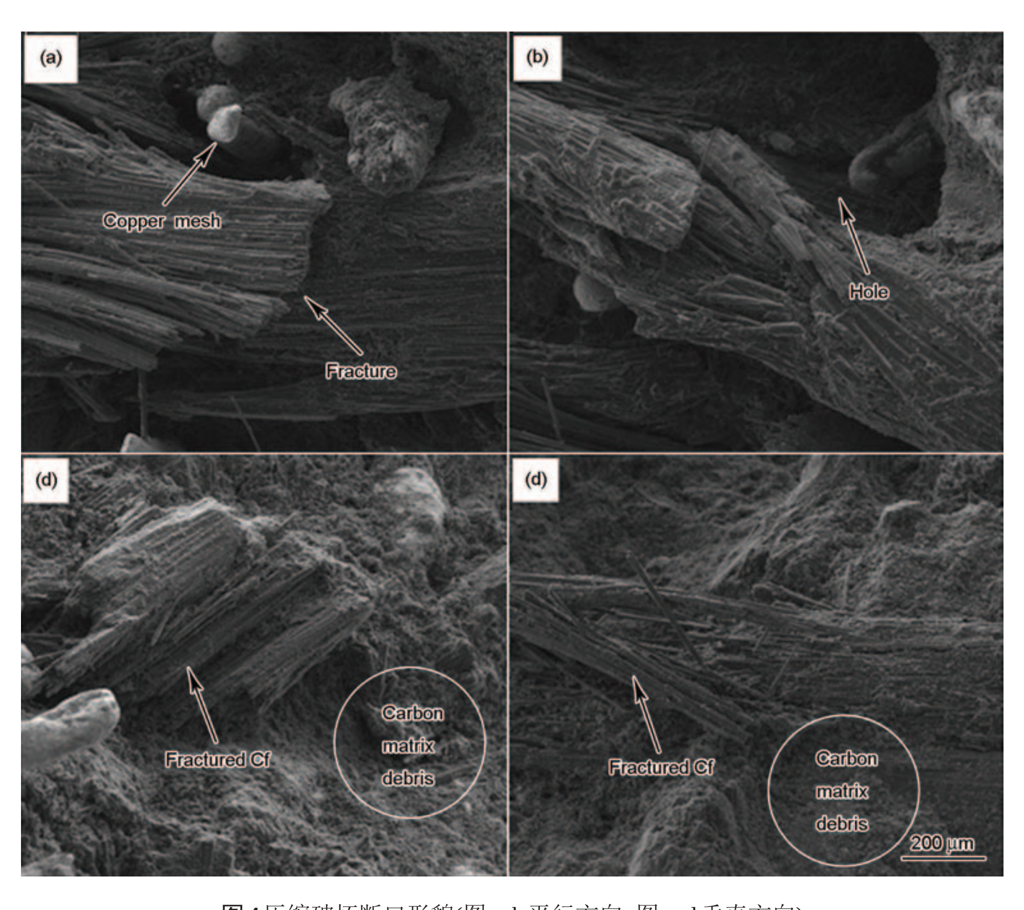



**图4** 压缩破坏断口形貌(图a、b平行方向；图c、d垂直方向)

**Fig.4** Micrographs of fractured surfaces of C/C-Cu composites (a, b: parallel direction; c, d: vertical direction)

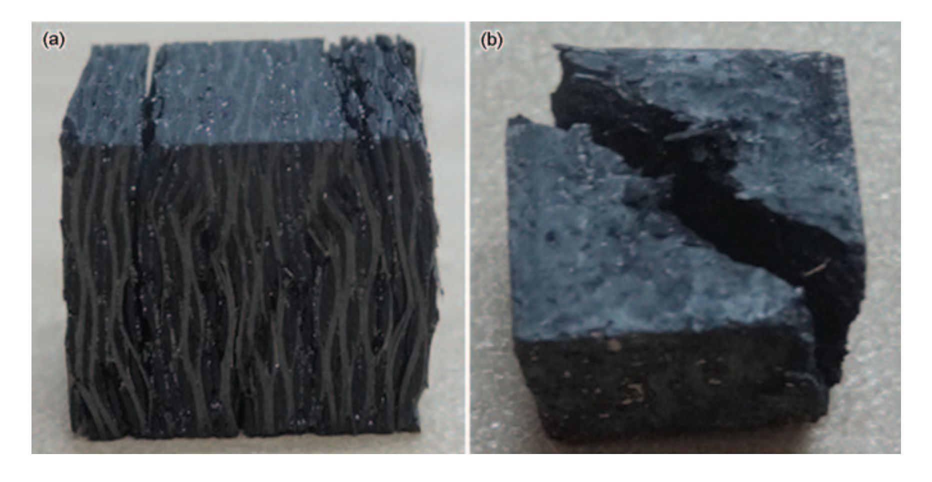



**图5** C/C-Cu复合材料压缩失效宏观图(a平行方向，b垂直方向)

**Fig.5** Macrographs of fractured of C/C-Cu composites (a: parallel direction; b: vertical direction)

坏应力分析，如图6a所示。

与平行方向压缩不同，在垂直方向压缩时试样任一横截面上的剪切破坏都引起纤维和铜网的断裂。在垂直方向压缩时纤维层、铜网和基体炭共同承受载荷(如图6b)，加之试样密度相对较低，因此其破坏方式为纤维层、铜网与基体炭的分离以及基体炭的压溃破坏。从图5b可见，裂纹的扩展方向与载荷加载的方向近似呈45°夹角。其主要原因是，在压缩过程中试样同时受到垂直于压缩面的外加载荷和平行于垂直面的剪切力。根据力的合成法则，合力为

$$\tau = \sigma_c \sin\theta\cos\theta \quad (4)$$

其中$\tau$为试样压缩所受合力(N)；$\sigma_c$为试样测试过程中加载的力(N)；$\theta$为测试过程中加载的力的方向与测试试样横向平面法向的夹角。从公式(4)可知，当$\sigma_c$为定值且$\theta$=45°时，$\tau$的值最大。故裂纹沿着

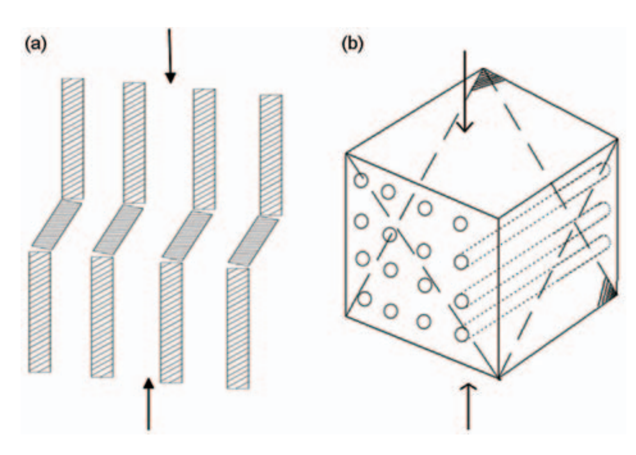



图6 压缩应力分布示意图(a水平压缩；b垂直压缩)

**Fig.6** Schematic description of compressive stress distribution (a: parallel direction; b: vertical direction)

最大合力方向，即$\theta$=45°的方向扩展。

## 3 结论

(1) 纤维体积分数是影响三种C/C-Cu复合材料压缩性能的重要因素。三种试样中炭纤维体积分数为45%的试样在垂直方向和平行方向上其压缩强度都最大，分别为190.13 MPa和83.39 MPa。

(2) 在垂直方向上，压缩性能随炭纤维体积分数的增加而提高，提高的幅度呈先大后小趋势。而在平行方向上，炭纤维体积分数的改变对压缩性能的影响没有在垂直方向上显著，与试样的致密度有关。在平行方向和垂直方向上压缩强度的差异表明，C/C-Cu复合材料的压缩性能具有明显的各向异性。

(3) 垂直压缩受力方向近似沿45°对角线方向时，破坏方式为纤维层、铜网与基体炭的分离以及基体炭的压溃破坏。在平行方向压缩时炭纤维发生褶皱，并在褶皱区域产生拉压应力，使纤维发生折曲或者断裂，最终在炭纤维与基体炭以及基体炭与铜网的界面分层劈裂。

## 参 考 文 献

[1] Froidh O. Perspectives for a future high-speed train in the Swedish domestic travel market[J]. Journal of Transport Geography, 2008, 16(4): 268

[2] Kubo S, Kato K. Effect of arc discharge on wear rate of Cu-impregnated carbon strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current[J]. Wear, 1998, 216(2): 172

[3] Yu Z P, Zhang H, Wu H B, et al. A Study on highspeed catenary-pantograph system[J]. China Railway Science, 1999, 20(1): 59
(于正平, 张 弘, 吴鸿标等.高速电气化铁路接触网-受电弓系统的研究[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(1): 59)

[4] Tan C. Research on preparation, microstructure and properties of carbon/carbon- copper composites[D]. Changsha: Central South University, 2013
(谭 翠. 炭/炭-铜复合材料的制备及其结构与性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013)

[5] Wang W F, Xiu S F, Ying M F, et al. Study on the microstructure and properties of copper-coated graphite/Cu matrix composite material[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1999, 23(2): 41
(王文芳, 许少凡, 应美芳等. 用镀铜石墨粉制备铜-石墨复合材料[J]. 机械工程材料, 1999, 23(2): 41)

[6] Kestursatya M, Kim J K, Rohatgi P k. Wear performance of copper graphite composite and a leaded copper alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2003, 339(1-2): 150

[7] Kubota Y, Nagasaka S, Miyauchi T, et al. Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current [J]. Wear, 2013, 302(s1-2): 1492

[8] Yang L, Ran L P, Yi M Z. Carbon fiber knitted fabric reinforced copper composite for sliding contact material[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 2365

[9] Yin J, Zhang H B, Xiong X, et al. Effect of porous C/C substrate density on compressive property of C/C-Cu composites[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2014, 19(6): 989
(尹 健, 张红波, 熊 翔等. 多孔体密度对C/C-Cu复合材料压缩性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014, 19(6): 989)

[10] Xiong X, Huang B Y, Xiao P. Compressive properties and fracture mechanism of quasi-3D C/C composites[J]. J. Central South University (Science and Technology), 2004, 35(5): 702
(熊 翔, , 黄伯云, 肖鹏等. 准三维C/C复合材料的压缩性能及其破坏机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(5): 702)

[11] Huang B Y. Manufacturing of Carbon/carbon Composites for Aircraft Brakes[M]. Hunan: Science and Technology Press, 2007
(黄伯云. 高性能炭/炭航空制动材料的制备技术[M]. 湖南: 科学技术出版社, 2007)

(责任编辑:黄 青)



